

Resumen

Proponemos y desarrollamos una hipótesis técnica que equipara al Sistema Tierra con un modelo electromagnético toroidal de forzamiento interno (METFI), y exploramos si modos toroidales internos —en particular ondas hidromagnéticas del tipo torsional/Alfvénicas y modos toroidales normales— pueden propagarse, acoplarse y dejar huellas detectables en la superficie terrestre mediante redes de sensores distribuidos (satélites, observatorios geomagnéticos y sistemas magnetotelúricos). Examinamos los mecanismos físicos de generación y transmisión (ondas torsionales en núcleo externo, acoplamiento electromagnético en la interfase núcleo-manto, y atenuación en el manto), describimos rutas observacionales plausibles (registros de campo magnético en banda larga, respuestas inducidas en magnetotelúrica de baja frecuencia, y correlatos sísmicos toroidales) y proponemos un esquema metodológico para extraer firmas espectrales asociadas a modos internos desde datos de satélite (p. ej. Swarm) y redes terrestres. Con base en trabajos observacionales y modelizaciones recientes, mostramos que ciertas señales interanuales y decadales atribuidas a dinámica del núcleo (p. ej. oscilaciones torsionales y modos Magneto–Coriolis) tienen expresión en la superficie y que combinaciones sinérgicas de técnicas pueden mejorar la relación señal/ruido. Finalmente, detallamos limitaciones físicas (disipación, mezcla espectral, fuentes superiores) y proponemos un plan de seguimiento integrado que prioriza bandas de frecuencia, configuración de redes y métodos de separación fuente-signature.

Palabras clave

METFI; toros toroidales; torsional oscillations; ondas Alfvénicas; magnetotelúrica; Swarm; observatorios geomagnéticos; seguimiento; acoplamiento núcleo-manto; modos toroidales.

Introducción y objetivo

La dinámica del fluido conductor en el núcleo externo genera la mayor parte del campo magnético terrestre mediante procesos de dínamo. En ese contexto, se han identificado —desde observaciones y modelos numéricos— modos específicos de oscilación del fluido y del campo magnético: **torsional oscillations** (ondas torsionales), modos Magneto–Coriolis y modos toroidales normales. Estas entidades, en la física presentada por el modelo METFI (Modelo Electromagnético Toroidal de Forzamiento Interno), pueden conceptualizarse como *toros toroidales* —estructuras de energía y campo con simetría azimutal capaces de propagarse radial y lateralmente— que, aunque originadas en el interior profundo, podrían dejar huellas en la superficie a través de acoplamientos electromagnéticos e inductivos. El objetivo de este trabajo es articular un marco técnico que describa cómo esas frecuencias internas podrían detectarse indirectamente en la superficie mediante redes de sensores distribuidos y procedimientos de análisis espectral y de inversión.

(Declaración metodológica: el presente artículo se ciñe a literatura científica de acceso abierto y publicaciones de revistas revisadas por pares y a series de trabajos académicos sin conflictos de interés institucional evidentes; en la sección de referencias se enumeran y sintetizan los textos utilizados).

Fundamento físico: modos toroidales internos y mecanismos de acoplamiento

Modos toroidales y ondas torsionales en el núcleo

El fluido del núcleo externo, sujeto a rotación y a un campo magnético preexistente, soporta modos torsionales: variaciones zonales (en velocidad de rotación diferencial) que se propagan en cilindros coaxiales alrededor del eje de rotación y se describen como ondas torsionales o ondas de Alfvén azimutales. Tales modos tienen frecuencias que van desde años a décadas, dependiendo de la estructura del campo y de la rigidez magnética del medio. Modelizaciones teóricas y simulaciones numéricas muestran que estos modos pueden comportarse como normal modes amortiguados cuyos parámetros (frecuencia, factor de calidad Q) dependen fuertemente del campo magnético y de la viscosidad magnética efectiva. ([Royal Society Publishing](#), [Wiley Online Library](#))

Acoplamiento electromagnético núcleo-manto y transmisión al exterior

El acoplamiento entre el núcleo y el manto se realiza a través de tensiones magnéticas y corrientes inducidas en capas conductoras; fuertes componentes toroidales del campo en la vecindad del límite núcleo-manto pueden inducir variaciones del campo en la superficie mediante procesos de inducción electromagnética y por medio de respuestas en la conductividad eléctrica del manto y de la litosfera. Investigaciones recientes demuestran que variaciones rápidas del campo del núcleo tienen huella en registros terrestres y satelitales, lo que permite inferir flujos en la superficie del núcleo vía inversión geodinamo. ([SpringerLink](#), [ResearchGate](#))

Atenuación y mezcla espectral en el manto

A diferencia de las ondas sísmicas, las señales electromagnéticas de muy baja frecuencia (periodos años–décadas) se propagan por inducción en el interior terrestre y se ven fuertemente moduladas por la distribución de conductividad eléctrica del manto. Esta atenuación es selectiva en frecuencia: las componentes de muy baja frecuencia penetran más profundamente pero sufren mayor mezcla y dispersión; las componentes de periodo interanual a decadales pueden sobrevivir en forma de cambios lentos en el campo observado en la superficie, si son suficientemente coherentes y de amplitud adecuada. Estudios de magnetotelúrica profunda muestran que anomalías de conductividad localizadas pueden favorecer respuestas amplificadas en ciertas latitudes/longitudes. ([PMC](#), [ResearchGate](#))

Vías observacionales para detectar modos toroidales en superficie

Para capturar huellas de modos internos es necesario combinar distintas plataformas y técnicas, cada una con ventajas y limitaciones complementarias.

Observatorios geomagnéticos terrestres (bandas largas)

Las series temporales de observatorios geofísicos proporcionan registros continuos del campo vectorial magnético con alta resolución temporal. Señales torsionales y jerks (cambios abruptos en la aceleración

secular del campo) han sido detectadas y caracterizadas en registros terrestres, y su detección permite seguir la dinámica superficial del campo con escalas temporales apropiadas. La ventaja es la larga historia de los observatorios; la desventaja: la contaminación por fuentes ionosféricas/inducidas y la necesidad de separación de fuentes. ([SpringerLink](#), [Wiley Online Library](#))

Satélites magnéticos (Swarm, CHAMP, anteriores)

Satélites vectoriales ofrecen cobertura global y son imprescindibles para resolver la estructura espacial de las señales de núcleo a escalas interanuales y decenales. Trabajos recientes usan datos de Swarm para identificar ondas interanuales en el campo magnético atribuibles a ondas Magneto–Coriolis y torsionales en el núcleo. La combinación satélite-terreno mejora la separación espacial de fuentes. ([PMC](#), [ScienceDirect](#))

Magnetotelúrica profunda y respuesta inductiva (MT)

Métodos MT miden la impedancia entre campos eléctricos y magnéticos naturales en la superficie, permitiendo inferir la conductividad con profundidad. Señales de baja frecuencia originadas por la dinámica del núcleo pueden inducir respuestas en la impedancia que, con adecuada reducción, destacarían como componentes coherentes en bandas largas. Las redes MT estacionarias de largo plazo, combinadas con análisis espectral robusto, ofrecen una vía para detectar respuestas inducidas vinculadas a modos internos. ([Wiley Online Library](#), [ScienceDirect](#))

Señales sísmicas toroidales como correlato mecánico

Aunque las ondas toroidales sísmicas (SH) son esencialmente mecánicas, su existencia y propiedades pueden ser correlacionadas con variaciones del campo magnético que reflejen cambios en la dinámica interna (por ejemplo, redistribución de fuerzas y torques entre núcleo e interior). La observación conjunta (multimodal) de cambios en espectros sísmicos de baja frecuencia y en poderes espectrales magnéticos puede fortalecer hipótesis de origen interno frente a fuentes externas. ([Wiley Online Library](#), [ScienceDirect](#))

Estrategia metodológica propuesta para inferencia de modos toroidales desde la superficie

Presento a continuación un protocolo integrado, práctico y escalonado para la identificación de firmas toroidales internas. Selección de bandas y ventanas temporales objetivo

Basado en modelizaciones y observaciones, priorizar bandas: interanual (~2–10 años), pluri-anual (6 años observado en algunas series) y decadales (>10 años para modos de baja frecuencia). Procesar series con ventanas largas (≥ 2 ciclos esperados) y con técnicas de detrending no lineal para retener aceleraciones y señales de baja frecuencia. ([PMC](#))

Preprocesado y separación de fuentes

- Filtrado multibanda y uso de descomposición empírica (EMD), SSA (singular spectrum analysis) y/o wavelets para extraer componentes lentas.
- Uso de correlación espacial: comparar patrones espaciales coherentes entre estaciones y con mapas satelitales; señales de núcleo muestran coherencia global y patrones dipolares/axiales particulares.

- Eliminación explícita de fuentes ionosféricas/solar-terrestres mediante índices geomagnéticos (K, AE) y modelos de corriente ionosférica.

Inversión y modelización forward

- Implementar modelos forward de inducción electromagnética con perfiles de conductividad del manto (modelos 1D y 3D) para cuantificar atenuación y fase.
- Inversión conjunta de datos satélite + superficie para recuperar mapas temporales de la variación del campo en la superficie del núcleo (core surface flow inversions), permitiendo inferir modos torsionales. ([Oxford Academic](#), [ScienceDirect](#))

Validación por coherencia multimodal

Requerir que una señal sea consistente en al menos dos dominios: (i) espacial y temporalmente coherente en observatorios/satélite, (ii) inducida en respuestas MT o correlatada con cambios en la gravedad/masas (si procede), o (iii) acompañada de correlatos sísmicos indirectos. Este requisito reduce falsos positivos por fuentes superficiales.

Procedimientos estadísticos y de significación

- Bootstrapping y pruebas de Monte Carlo para evaluar persistencia espectral frente a ruido con estructura (1/f).
- Comparación con realizaciones sintéticas de ruido geomagnético y de ionosfera.
- Estimación de factor de calidad Q de los modos sugeridos y cálculo de incertidumbres mediante ensembles.

Casos y evidencia empírica relevante

Detecciones satelitales recientes y ondas Magneto–Coriolis

Análisis de series satelitales han identificado señales interanuales y patrones coherentes atribuibles a ondas Magneto–Coriolis y otras ondas hidromagnéticas en el núcleo, lo que apoya la presencia de modos de baja frecuencia con expresión en la superficie magnética. Estas detecciones muestran que la señal de modos internos puede ser resuelta con datos de cobertura global y modelos inversos robustos. ([PMC](#), [ScienceDirect](#))

Evidencia de torsional oscillations en registros terrestres

Estudios clásicos y contemporáneos han demostrado que torsional oscillations explican parte de la variación secular y de ciertas señales decenales en la longitud del día y en el campo magnético; estos trabajos ofrecen base teórica para esperar marcas observables en la superficie. ([Sistema de Datos de Astrofísica](#), [ResearchGate](#))

Señales periódicas pluri-anales (p. ej. ~6 años)

Se ha identificado una señal ~6 años presente en la aceleración secular y otros series geodésicas y magnéticas; su existencia sugiere modos coherentes que afectan tanto la dinámica rotacional como la

geomagnética, lo que implica un acoplamiento físico entre procesos internos y manifestaciones superficiales. ([PMC](#), [Wiley Online Library](#))

Limitaciones físicas, ambigüedades y riesgos de interpretación

1. **Atenuación y pérdida de coherencia:** el manto actúa como filtro que atenúa fuertemente amplitudes y mezcla fases, limitando la detectabilidad de modos débiles.
2. **Fuentes externas y ruido:** ionosfera, magnetosfera y actividad solar depositan energía en bandas que pueden solaparse con las de interés; separar fuentes exige modelos robustos y datos auxiliares.
3. **No unicidad de la inversión:** múltiples distribuciones de flujo en la superficie del núcleo pueden producir campos superficiales semejantes; la regularización y la incorporación de restricciones físicas (p. ej. simetría axial) son imprescindibles.
4. **Resolución temporal vs. espacial:** detectar modos de periodo largo requiere series extensas; la cobertura espacial adecuada exige combinar satélite y tierra.
5. **Confusión electro-mecánica:** correlaciones con modos sísmicos no implican causalidad directa; deben interpretarse como indicadores de reconfiguraciones internas concomitantes.

Propuesta operativa de seguimiento (plan resumido)

- Establecer una red piloto de seguimiento combinada: 30 observatorios geomagnéticos bien calibrados + 10 estaciones MT de largo plazo + uso de bases de datos satelitales (Swarm, CHAMP histórico).
- Procesado: pipeline reproducible que implemente SSA/EMD + coherencia espacial y correlación con índices geomagnéticos para separar fuentes externas.
- Modelización: forward electromagnética con perfiles de conductividad tomados de estudios MT globales y de modelos anclados en datos sísmicos.
- Validación: requerir detección consistente en al menos dos plataformas y con significación estadística ($p < 0.05$) frente a ruido estructurado.
- Entregables: mapas temporales de variación del campo en la superficie del núcleo, estimación de frecuencias modales y factores Q, y un repositorio abierto con datos y código para reproducibilidad.

Discusión: implicaciones para METFI y perspectivas interpretativas

Si modos toroidales internos fueran robustamente detectados desde la superficie mediante la metodología propuesta, esto reforzaría la viabilidad del esquema METFI —es decir, la Tierra operando como un sistema con toros toroidales electromagnéticos internos que ejercen forzamiento sobre capas exteriores— en tanto manifestación física observable. Tal confirmación no implica la exclusividad del mecanismo (otros procesos

pueden contribuir), pero aportaría evidencia empírica de que las dinámicas internas dejan huella electromagnética coherente en la superficie y que la combinación de observaciones satélite-terrestre y técnicas de inversión puede recuperar esa información.

Conclusiones

- Modos torsionales y toroidales del núcleo pueden, en principio, generar señales electromagnéticas de baja frecuencia con huella en la superficie. ([Royal Society Publishing](#), [Wiley Online Library](#))
- Satélites magnéticos (Swarm) y observatorios terrestres ya han documentado señales interanuales y decadales compatibles con ondas hidromagnéticas internas; esto permite plantear detección integrada. ([PMC](#), [SpringerLink](#))
- La magnetotelúrica profunda y la inversión conjunta satélite-terreno son herramientas clave para inferir la expresión superficial de modos internos pero requieren control estricto de fuentes externas. ([Wiley Online Library](#), [ResearchGate](#))
- Una estrategia práctica combina análisis multibanda, separación de fuentes por coherencia espacial, modelos forward de inducción y validación multimodal; dicha estrategia es factible con las plataformas existentes.
- Limitaciones importantes (atenuación en el manto, mezcla espectral, no unicidad de la inversión) obligan a criterios estrictos de significación y replicación.

Referencias

Nota: a continuación se listan referencias revisadas por pares y fuentes académicas relevantes, con un breve resumen de aportes y relación con METFI y la hipótesis de propagación toroidal.

1. **Waves in the Earth's core. I. Mildly diffusive torsional oscillations** — (Royal Society / 2021).
Resumen: Modelización teórica y numérica de modos torsionales en condiciones geofísicas realistas; cálculo de frecuencias, tasas de decaimiento y factores de calidad Q. *Relación:* fundamenta la plausibilidad física y parámetros modales relevantes para detecciones superficiales. ([Royal Society Publishing](#))
2. **Satellite magnetic data reveal interannual waves in Earth's core** — Gillet et al., 2022 (AGU / PNAS/related).
Resumen: Análisis de datos satelitales (Swarm) que identifica ondas interanuales atribuibles a dinámicas del núcleo (Magneto–Coriolis). *Relación:* demuestra que satélites modernos pueden resolver modos con expresión superficial coherente. ([PMC](#))
3. **Rapid Variations of Earth's Core Magnetic Field** — V. Lesur et al., 2022 (revista de síntesis).
Resumen: Revisión de evidencias de variaciones rápidas del campo del núcleo y de técnicas para extraer su estructura espacio-temporal desde observatorios y satélites. *Relación:* aporta métodos para extraer señales de núcleo y contextos metodológicos de inversión. ([SpringerLink](#))

4. **Torsional oscillations and the magnetic field within the Earth's core** — (Nature, 1997 / trabajos clásicos).
Resumen: Identificación temprana de torsional oscillations y su impacto sobre la variación del campo y la longitud del día. *Relación:* base clásica que conecta dinámica interna con observables superficiales. ([Sistema de Datos de Astrofísica](#))
5. **Magnetotelluric interpretation tools and conductivity anomalies** — Özyıldın et al. / Lin et al. (2020–2023).
Resumen: Métodos de interpretación MT y revisión de mecanismos de conducción profunda. *Relación:* fundamenta el uso de MT para evaluar cómo la conductividad del manto modula la transmisión de señales internas. ([Wiley Online Library](#), [PMC](#))
6. **Assessing the importance and expression of the 6 year geomagnetic signal** — Aguilar et al. (CHAOS analysis 2012 / studies posteriores).
Resumen: Identificación y caracterización de una señal ~6 años en aceleración secular y su relación con "jerks". *Relación:* ejemplo de componente pluri-anual con expresión superficial coherente. ([Wiley Online Library](#), [PMC](#))

Desarrollo matemático — modos toroidales, acoplamiento e inducción

Notación y constantes útiles

- (permeabilidad del vacío).
- : conductividad eléctrica (S m); varía por capas (manto bajo: – S/m; núcleo: – S/m en estimaciones clásicas).
- : difusividad magnética (m/s).
- : densidad del fluido (kg m); núcleo externo ~ kg m (orden de magnitud).
- : módulo característico del campo magnético local (T).
- : longitud característica (m) — p. ej. radio del núcleo externo .
- : velocidad característica del fluido (m s).
- : frecuencia (Hz), (s).

Ecuaciones básicas (MHD en regímenes relevantes)

Ecuación de inducción magnética (completa)

La ecuación de inducción en magnetohidrodinámica (MHD) es:

donde . La primera parte representa advección/estiramiento del campo por el fluido y la segunda la difusión magnética.

Número de Reynolds magnético

Se define para estimar si la advección domina sobre la difusión:

- Si Re_m , la dinámica magnética está dominada por advección (región dínamo-efectiva).
- Si $\text{Re}_m < 1$, la difusión domina y las estructuras magnéticas se atenúan rápidamente.

Escala típica en el núcleo (ejemplo): tomar $\tau_{\text{diff}} \approx 10^4$ años.

Cálculo:

1. $(H \cdot S / m)$ cancela a $1/\text{ms}^2$; numérico: 10^{-11}).
2. Entonces $\text{Re}_m \approx 10^4$.

Resultado: ($\gg 1$), consistente con dinámica dominada por advección en el núcleo.

Ondas Alfvénicas y torsionales: relación de dispersión y velocidad

En un medio conductor con densidad ρ y campo magnético B , la velocidad Alfvénica es:

Para una onda Alfvénica unidimensional la relación de dispersión simple es

con número de onda k .

Estimación numérica (orden de magnitud):

Tomemos $B = 1 \text{ mT}$, $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Cálculo detallado:

1. $v_A = B / \sqrt{\mu_0 \rho}$
Numéricamente: $v_A \approx 0.009 \text{ m/s}$, así $v_A \approx 0.9 \text{ cm/s}$.
2. $\omega = v_A k$
3. $\tau = 2\pi / \omega$

Resultado: ($\approx 0.009 \text{ m/s} \approx 0.9 \text{ cm/s}$).

Tiempo de cruce (escala τ):

Cálculo:

1. Dividimos: $\tau_{\text{diff}} / \tau \approx 10^4 \text{ años} / 10^{-11} \text{ s} \approx 10^{15}$.
2. $\tau_{\text{diff}} \gg \tau$ (mejor: compute precisely)
3. Entonces $\tau_{\text{diff}} \gg \tau$.

Convertir a años:

Interpretación: con los valores asumidos, una perturbación Alfvénica elemental tardaría del orden de una década en cruzar la escala del núcleo — coherente con escalas interanuales a decadales observadas para modos torsionales.

Ondas torsionales en cilindros coaxiales (modelo reducido)

Para torsional oscillations (rotación diferencial dependiente de la distancia al eje), una aproximación útil escribe la ecuación para la velocidad angular perturbada (simplificada, 1D radial en):

donde es la componente axial efectiva del campo que actúa como "tensión magnética" que sostiene la onda torsional. En el caso aproximadamente constante, la ecuación se reduce a una forma de onda con velocidad efectiva del orden . La forma completa incluye efectos de curvatura y geometría esférica; sin embargo, la escala temporal sigue dominada por y por la geometría efectiva de los cilindros de flujo.

Atenuación electromagnética (skin depth) en medios conductores

Para ondas electromagnéticas de baja frecuencia en un medio conductor homogéneo, la profundidad de penetración (skin depth) es:

Esta fórmula es válida en el límite de ondas que se atenúan exponencialmente por difusión magnética; da la distancia a la que la amplitud se reduce por factor .

Ejemplo numérico — banda decadales y manto razonable

Consideremos un modo con período años. Calculemos y para dos valores representativos de (manto débil S/m y manto más resistivo S/m).

Paso A — calcular y :

1. Un año tiene s (uso del año juliano medio).
- 2.

Paso B — caso :

1. Calculemos en pasos:
 - Multiplicar por :
 - (aprox). Entonces
 - .
 - .
 - Producto:

Resultado:

Interpretación: es mucho mayor que el radio terrestre (), lo que implica que a la frecuencia decadal la atenuación en un manto con es **débil**: las variaciones magnéticas profundas pueden influir en superficie sin sufrir corte exponencial rápido.

Paso C — caso : (idéntica estructura de cálculo; será 10 veces menor, por tanto aumentará por .)

- Resultado aproximado: mejor calcular: si es 10× menor, denom se divide por 10 → aumenta por .
-

Conclusión: para frecuencias decenales e interanuales, la piel magnética en mantos de baja conductividad suele ser enorme comparada con el espesor terrestre; la difusión magnética NO impide la transmisión a la superficie en estas bandas — la limitación real vendrá más de mezcla espectral, ruido externo y decaimiento geométrico que de un simple efecto de skin en el manto no muy conductor.

Decaimiento geométrico de armónicos esféricos (transmisión potencial)

Si la variación en el campo es producida en la superficie del núcleo (radio R) y se propaga al exterior en la región no-conductora (o con conductividad pequeña en escala del periodo), los armónicos esféricos de grado n decaen con la ley:

Para la componente dipolar ($n=1$):

Cálculo numérico:

- Cociente:
- Cálculo:

1.

Resultado: . Es decir, el dipolo se atenúa a ~16% de la amplitud en la superficie si se ignora la difusión y otras fuentes.

Para (cuadrupolar), el factor sería (más atenuado), y así sucesivamente: los armónicos de mayor grado se atenúan más fuertemente.

Modelo simple de transferencia (combinando decadencia armónica y atenuación difusiva)

Propongo usar una fórmula índice para estimar la amplitud esperada en superficie A_s a partir de una amplitud en la superficie del núcleo A_n :

donde δ es un espesor efectivo conductor que la señal debe atravesar (p. ej. grosor del manto conductor relevante). Si $\delta \ll R$, el término exponencial es ≈ 1 .

Uso práctico: para periodos largos (interanual–decadal) con $\delta \ll R$, el factor geométrico domina la reducción, pero no implica pérdida total de detectabilidad.

Factor de calidad y decaimiento de modos

Para un modo libre amortiguado, la amplitud decae como $e^{-\gamma t}$, con tiempo de decaimiento $\tau = 1/\gamma$. El factor de calidad Q se relaciona con γ y la frecuencia f por:

Si se mide que la amplitud de un pico modal cae un factor e en τ , se puede inferir Q . Esto es útil para distinguir modos con amortiguamiento magnético fuerte (bajo Q) frente a modos sostenidos por forzamiento.

Señal vs. ruido: criterios de detectabilidad espectral

Sea S la densidad espectral de potencia de la señal modal en la superficie y N la del ruido (ionosférico, magnetosférico, instrumentación). Usamos la relación señal a ruido integrada en banda B :

Para la detección robusta recomendamos:

- Ventanas temporales de al menos (dos veces la vida modal esperada) para estimar la línea modal.
- Uso de métodos estadísticos robustos (bootstrap, Monte Carlo sobre ruido con ley) para evaluar significación.
- Requisito multimodal: coherencia entre satélite/terrestre/MT en mismo bin frecuencial y coherencia espacial.

Ejemplo de pipeline cuantitativo (resumen matemático)

1. Extraer series temporales en estaciones y datos satélite .
2. Filtrado en banda de interés con wavelets o filtros Butterworth de orden .
3. Calcular densidad espectral por estación: .
4. Estimar coherencia espacial entre pares :
donde es la densidad espectral cruzada. Alto indica señal común.
5. Ajustar modelo forward (parámetros: , perfiles) para minimizar:
6. Evaluar incertidumbres por ensambles (bootstrap/Jackknife).

Observaciones finales sobre escalas y detectabilidad

- Las estimaciones numéricas muestran que para bandas interanuales–decadales la piel magnética en mantos poco conductores es extremadamente grande → la difusión magnética **no impide** en principio la transmisión de señales a la superficie.
- La atenuación geométrica de armónicos es significativa para grados altos; los modos de bajo orden (pequeño) son los más favorables para detección.
- La velocidad Alfvénica con parámetros razonables da tiempos de cruce de orden años–décadas, coherente con frecuencias observadas en trabajos empíricos —por tanto los modos torsionales son físicamente plausibles como fuente.
- La determinación práctica de amplitudes de núcleo a superficie requiere combinación de: (i) estimación del campo en la superficie del núcleo () por inversión; (ii) aplicación del factor geométrico; (iii) inclusión del efecto de la conductividad radial y del apantallamiento ionosférico/externo en .

A continuación se entregan **dos estudios de caso aplicados** (uno centrado en detección interanual usando Swarm + GVO; otro en detección pluri-anual/decadal combinando Swarm + observatorios INTERMAGNET + MT), con pipeline reproducible, fragmentos de código Python (bibliotecas recomendadas), parámetros numéricos concretos, criterios de significación y ejemplos de interpretación. Todos los pasos están pensados para que los puedas ejecutar en un entorno de trabajo (con `viresclient`, `pandas`, `numpy`, `scipy`, `magpysv/SSA` y herramientas de inversión). A continuación va el material.

Fuentes clave usadas en estos estudios de caso

- Gillet et al., *Satellite magnetic data reveal interannual waves in Earth's core* (PNAS, 2022) — detección de ondas interanuales en datos Swarm; base conceptual y espectral. ([PNAS](#))
- CHAOS geomagnetic field model (CHAOS-7) — modelo de referencia para comparar series e inversión conjunta satélite–terrestre. ([SpringerOpen](#))
- ESA Swarm data (datos L1b/L2 y acceso via VirES) — local de descarga de series satelitales y documentación. ([earth.esa.int](#))
- INTERMAGNET — fuente y acceso a series definitivas de observatorios terrestres. ([intermagnet.org](#))
- MagPySV (Cox et al., 2018) — paquete Python para crear series de variación secular internas (GVO / SV) reproducibles; útil para preprocesado y extracción de señales internas. ([Wiley Online Library](#))

Estudio de caso A — Detección interanual (2–10 años) con Swarm + GVO

Objetivo

Reproducir un flujo para detectar una señal interanual coherente atribuible a ondas hidromagnéticas internas (ondas Magneto–Coriolis / torsionales), recuperable en series Swarm y en series GVO derivadas de datos satélite y observatorios.

Resumen del flujo

1. Descargar series Swarm L1b magnéticas y datos de observatorio (INTERMAGNET).
2. Construir GVOs (Geomagnetic Virtual Observatories) mensuales usando métodos de ventana (ej.: 1-mes y 4-mes GVO) y/o MagPySV.
3. Preprocesado: calibración, remoción de datos afectados por tormentas (índices K/AE), transformación a sistema cartesiano geocéntrico.
4. Filtrado banda-ancha: diseñar un **bandpass** en periodo años (frecuencia).
5. Descomposición: SSA (Singular Spectrum Analysis) o EMD para separar componente lenta y extraer modo modal.
6. Coherencia espacial y coherencia satélite-observatorio: calcular coherencia espectral y densidad espectral cruzada; requerir coherencia alta (>0.6) en banda objetivo entre estaciones y GVOs.
7. Validación estadística: ensambles bootstrap ($N=1000$) sobre ruido $1/f$ para obtener p-valor y estimar SNR.
8. Interpretación: si SNR integrada > 3 y coherencia > 0.6 en múltiples nodos, se considera detección viable.

Paso a paso técnico (comandos y pseudocódigo)

A) Descarga de datos (Swarm via VirES / observatorios INTERMAGNET)

- Requisitos: python, viresclient, pandas, numpy, scipy, matplotlib, magpySV/ssa (o pyssa).
- Ejemplo breve (pseudocódigo Python):

```
from viresclient import SwarmRequest
import pandas as pd
# ejemplo con viresclient: obtener MAGN data para 2014-01-01 a 2023-12-31
client = SwarmRequest()
client.set_collection('SW_OPER_MAGA_LR_1B')
client.set_products(['vector_X', 'vector_Y', 'vector_Z'])
client.set_time('2014-01-01', '2023-12-31')
client.set_geographical(-180, -90, 180, 90)
client.execute()
df_swarm = client.to_pandas()
# Guardar csv para reproducibilidad
df_swarm.to_csv('swarm_maga_2014-2023.csv', index=False)
```

Cita: la API VirES y viresclient permiten acceder a L1b/L2 Swarm (documentación y tutoriales oficiales). (notebooks.vires.services, earth.esa.int)

Para observatorios INTERMAGNET, descarga por estación (ej. BGS portal o NOAA mirror):

```
# ejemplo: descargar series horarias/1-min desde INTERMAGNET (portal BGS/imag)
# se recomienda descargar datos definitivos cuando estén disponibles
```

B) Construcción de GVOs (opción MagPySV)

- magpySV permite construir series de SV internas con ventanas y denoising.
- Parámetros recomendados:
 - Ventana GVO: 1-mes y 4-mes (para comparar resolución vs. ruido).
 - Regularización espacial: spherical cap or Slepian (si trabajas regionalmente).
- Pseudocódigo:

```
from magpySV import GvoBuilder
gvo = GvoBuilder(sw_data=df_swarm, obs_data=df_obs)
gvo.set_window('4M') # 4 months
gvo.run()
gvo_series = gvo.to_dataframe()
```

Referencia metodológica: MagPySV (Cox et al., 2018) describe prácticas reproducibles para construir series internas. ([Wiley Online Library](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mag.201800001))

C) Preprocesado y limpieza

- Masking: eliminar pasadas con actividad geomagnética elevada (p. ej. $K_p > 4$ o $AE > 200$) para reducir contaminación ionosférica.
- Baseline correction: corregir saltos instrumentales y drifts aplicando spline detrend o ajuste robusto.
- Transformaciones: convertir a Gauss o nT según convención; déjalo siempre en nT para comparaciones.

D) Filtrado banda y descomposición modal

- Bandpass ideal: periodos . En frecuencia:
- Diseña un filtro Butterworth de orden 4 aplicado en forward-backward (filtfilt) para evitar fase.
- SSA: elegir ventana $L \approx 0.5 \cdot (n_samples) \cdot (fracción)$ — en prácticas con series de 10 años mensuales ($n \approx 120$), $L=40-60$ suele funcionar para separar modas interanuales.
- Ejemplo (Python, conceptual):

```
from scipy.signal import butter, filtfilt
fs = 12.0 # muestras por año (mensual)
low = 1/10.0
high = 1/2.0
b,a = butter(4, [low/(0.5*fs), high/(0.5*fs)], btype='band')
component = filtfilt(b,a, gvo_series['B_r'])
# luego SSA sobre component si quieres separar componentes cercanas
```

E) Coherencia y SNR

- Calcular coherencia espectral entre GVO y estaciones (método welch, segment length $\sim 1/2 \cdot T_window$).
- Requisito práctico sugerido:
 - coherencia promedio en banda ≥ 0.6 entre al menos 5 nodos distribuidos (globalmente preferente).
 - SNR integrada en la banda ($SNR = signal_power / noise_power$) ≥ 3 para detección robusta.
- Bootstrap: generar series nulos que sigan ley $1/f$ (estimada desde la banda alta) y calcular la distribución de SNR; p-valor < 0.05 para detección.

F) Interpretación numérica esperada (valores de referencia)

- Gillet et al. muestran que las ondas interanuales vistas en Swarm tienen amplitudes superficiales detectables con dataset moderno; valores típicos para modos interanuales en la superficie son del orden de **unos nT** en componentes radiales/tangenciales en picos de señal regionales (usar CHAOS para referencia espacial). Interpretar amplitudes a la luz del factor geométrico (ver sección matemática que ya desarrollamos). ([PNAS](#), [SpringerOpen](#))

Estudio de caso B — Señal pluri-anual/decadal (6 años) con Swarm + observatorios + MT

Objetivo

Detectar y validar una señal pluri-anual (ej. años) identificada en múltiples estudios (jerks/pluri-anales) mediante combinación de satélite, observatorios y evidencia desde magnetotélúrica pasiva (respuestas inducidas).

Flujo resumido

1. Descargar Swarm L2 core field products (o usar CHAOS residuals) y series definitivas INTERMAGNET (≥ 20 años si es posible). (earth.esa.int, intermagnet.org)
2. Construir series de aceleración secular (segunda derivada temporal del campo) o usar outputs de CHAOS como referencia.
3. Filtrar alrededor de años (bandpass 4–8 años) y aplicar SSA para separar una componente ~6-yr.
4. Correlación con estaciones MT de largo plazo: procesar respuesta impedancia y buscar cambios sistemáticos en amplitud coherentes con la banda.
5. Realizar inversión forward de inducción para probar si una perturbación en la superficie del núcleo con amplitud (nT) puede generar la amplitud observada en superficie considerando conductividad radial (usar modelo 1D de conductividad del manto).
6. Verificación: la señal debe presentarse en satélite, en estaciones terrestres y como respuesta sostenida en MT (óptimo si variantes regionales coinciden espacialmente).

Detalles técnicos y pseudocódigo

A) Serie de aceleración secular

- Para series mensuales, la aceleración secular se aproxima por segunda derivada numérica:
- Reduce sensibilidad a ruido diferenciando después de aplicar filtro suave (p. ej. Savitzky-Golay con ventana grande).

B) Filtrado en banda 4–8 años y SSA

- Similar a estudio A, ajusta Butterworth bandpass a .
- SSA: $L \approx 0.6 \cdot n_{\text{samples}}$ (si tienes series largas).

C) Comparación con MT (magnetotelúrica)

- Obtener respuestas MT de estaciones con datos pasivos de larga duración (si están disponibles en la región).
- Analizar impedancia y conductividad aparente; buscar tendencias en amplitud fase en banda 4–8 años — un patrón consistente sugiere una respuesta del manto a forzamiento de baja frecuencia. Referencia: interpretaciones MT profundas. (earth.esa.int)

D) Inversión forward 1D (estimación rápida)

- Asume en superficie del núcleo (hipótesis: 1–5 nT en armónico dipolar/low-order). Usa la fórmula de transferencia del apartado matemático:
- Ejemplo numérico rápido: para , (ver cálculo previo). Si nT entonces nT (sin atenuación difusiva significativa). Compara con series: si observas ~0.5–1.5 nT a esa banda, la hipótesis es plausible; si observas $\ll 0.1$ nT, la fuente estimada en el núcleo debería ser mayor o la señal no provenir del núcleo. (Usar CHAOS y errores de modelo para acotar amplitud plausible). ([SpringerOpen](https://www.springeropen.com))

Criterios prácticos de aceptación

- Coincidencia en frecuencia central ($\pm 10\%$) entre satélite y al menos 6 observatorios.
- Coherencia espacial que muestre patrón de signo y amplitud compatibles con armónicos de bajo grado (dipolo/quad).
- $\text{SNR} \geq 2.5-3$ frente a ruido $1/f$ y pruebas bootstrap $p < 0.05$.
- Compatibilidad forward con razonable ($1-10$ nT) y factores geométricos/MT (no requerir físicamente implausible).

Notas operativas, recomendaciones prácticas y scripts reutilizables

1. **Ambiente reproducible:** usa conda env con viresclient, numpy, pandas, scipy, matplotlib, magpysv, pyssa/pyEMD, obsp y (si usas correlatos sísmicos).
2. **Registro y versión:** conservar metadatos y versiones (Swarm product version, CHAOS model version) para trazabilidad—ej.: CHAOS-7 referencia. ([SpringerOpen](#))
3. **Copia local de datos:** guarda submuestras netas (CSV/NetCDF) y pipelines en GitHub (README con pasos). Puedes usar VirES notebooks como ejemplo y adaptar. ([notebooks.vires.services](#))
4. **Parámetros concretos sugeridos (resumen rápido):**
 - Ventana GVO: 4 meses (y 1 mes para contraste).
 - Filtros: Butterworth orden 4, bandpass 2–10 yr (study A) / 4–8 yr (study B).
 - SSA: L entre 30–60 (para series mensuales de ~10 años).
 - Bootstrap: $N=1000$, ruido $1/f$ ajustado por máxima verosimilitud.
 - Criterios: coherencia ≥ 0.6 ; $\text{SNR} \geq 3$; $p < 0.05$.

Conclusión práctica

Con las herramientas y datos disponibles (Swarm + INTERMAGNET + MT + software reproducible como viresclient y MagPySV) es perfectamente factible diseñar y ejecutar experimentos para buscar modos toroidales interanuales y pluri-anuales. Las detecciones reportadas en la literatura reciente (Gillet et al. y trabajos afines) muestran que la señal existe en la cobertura satelital moderna y que la inversión conjunta satélite-observatorio (p. ej. CHAOS) es la vía para cuantificarla y validar hipótesis sobre su origen interno. ([PNAS](#), [SpringerOpen](#))